(5). Safarov I.I., Teshaev M.K., Akhmedov A.B. (2020). Numerical study of dynamic characteristics of viscoelastic systems. Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics, 19(2), p. 75–86. https://doi.org/10.17512/jamcm.2020.2.07

(6). Khudoynazarov K., Abdikarimov A. (2019). Torsion vibrations of a viscoelastic cylindrical shell filled with a liquid. AIP Conference Proceedings, 2186(1), Article 080005. https://doi.org/10.1063/1.5138012

(7). Sobotka Z. (1984). Rheology of materials and engineering structures. Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2009-0-09319-3

(8). Barnes H.A., Hutton J.F., Walters K. (1989). An introduction to rheology. Elsevier. https://doi.org/ 10.1016/C2009-0-08805-X

(9). Tschoegl N.W. (1989). The phenomenological theory of linear viscoelastic behavior: An introduction. Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-73602-5

(10). Lakes R.S. (2009). Viscoelastic materials. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/ CBO9780511626722

(11). Joseph D.D., Narain A., Riccius O. (1986). Shear wave propagation and inertia in viscoelastic fluids. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 19(3), p. 237–303. https://doi.org/10.1016/0377-0257(86)80001-3

(12). Baumgaertel M., Winter H.H. (1989). Determination of discrete relaxation time spectra for polymer melts from dynamic mechanical data. Rheologica Acta, 28(6), p. 511–519. https://doi.org/10.1007/BF01332922

(13). Pipkin A.C. (1986). Lectures on viscoelasticity theory (2nd ed.). Springer-Verlag. https://doi.org/ 10.1007/978-1-4612-4952-8

(14). Ewoldt R.H., McKinley G.H. (2010). On secondary loops in LAOS via harmonic generative rheology. Rheologica Acta, 49(2), p. 213–219. https://doi.org/10.1007/s00397-009-0408-2

Muxitdinova Feruza Rustam qizi (Namangan davlat Texnika univarsiteti, fizika-matematika fanlari nomzodi; e-mail: feruzafizik1991@gmail.com),
Maxmudjonov O‘rinboy Valijon o‘g‘li (Namangan davlat Texnika universiteti tayanch doktoranti; E-mail: urinboyfizik@gmail.com)

BIPOLYAR TRANZISTORNING VOLT-AMPER XARAKTERISTIKASIGA KO‘NDALANG MAGNIT MAYDON TA’SIRINING ANALITIK MODELI

Annotatsiya. *Maqolada ko‘ndalang magnit maydonning bipolyar tranzistor volt-amper xarakteristikasiga (VAX) ta’siri nazariy jihatdan o‘rganilgan. Dastlab, p-n-p strukturaning VAXi klassik diffuzion nazariya doirasida izchil keltirib chiqarilgan: bazadagi zaryad tashuvchilar uchun uzluksizlik tenglamasi p--n o‘tish nazariyasining chegaraviy shartlari bilan yechilib, inyeksiyalangan kovaklar taqsimoti, kollektor tok zichligi va bazada tashish koeffitsiyenti uchun yopiq analitik ifodalar olingan. So‘ngra magnit maydon ta’siri Drude modeli va Eynshteyn munosabati asosida kiritilgan: magnit maydon induksiyasi ortishi bilan ozchilik tashuvchilarning effektiv harakatchanligi, diffuziya koeffitsiyenti va diffuziya uzunligi kamayishi ko‘rsatilgan, bu esa bazaning effektiv qalinlashuviga ekvivalentdir. Kollektor toki va bazada tashish koeffitsiyentining magnit maydondagi umumlashgan analitik ifodalari olingan. Kuchsiz maydonlar soha-sida effekt magnit maydon induksiyasiga kvadratik bog‘liq bo‘lib, tashuvchilar harakatchanligi kvadratiga proporsional ekanligi aniqlangan, shuning uchun yuqori harakatchanlikka ega materiallarda sezgirlik kes-kin ortadi. Germaniy uchun bajarilgan sonli hisoblashlar 2 Tl induksiyada kollektorning to‘yinish toki 13 %ga, 4 Tlda esa 38%ga kamayishini ko‘rsatadi. Modelning qo‘llanish chegaralari muhokama qilingan hamda yondashuvni ikki o‘lchamli elektron gazli geteroo‘tishli maydon tranzistorlariga kengaytirish istiq-bollari belgilangan.*

Kalit so‘zlar: *bipolyar tranzistor, volt-amper xarakteristikasi, ko‘ndalang magnit maydon, ozchilik zaryad tashuvchilar, diffuziya uzunligi, harakatchanlik, Hall burchagi, bazada tashish koeffitsiyenti, magnitotranzistor, magnitosezgirlik.*

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Аннотация. *В статье теоретически исследовано влияние поперечного магнитного поля на вольт-амперную характеристику (ВАХ) биполярного транзистора. Сначала ВАХ структуры p-n-p последовательно получена в рамках классической диффузионной теории: уравнение непрерывности для неосновных носителей заряда в базе решено с граничными условиями теории p–n перехода, получены замкнутые аналитические выражения для распределения инжектированных дырок, плотности коллекторного тока и коэффициента переноса базы. Затем влияние магнитного поля введено на основе модели Друде и соотношения Эйнштейна: показано, что с ростом индукции магнитного поля эффективная подвижность, коэффициент диффузии и диффузионная длина неоснов-*

ных носителей уменьшаются, что эквивалентно эффективному утолщению базы. Получены обобщённые аналитические выражения для коллекторного тока и коэффициента переноса базы в магнитном поле. Установлено, что в области слабых полей эффект квадратичен по индукции магнитного поля и пропорционален квадрату подвижности носителей, поэтому чувствительность резко возрастает в материалах с высокой подвижностью. Численные расчёты, выполненные для германия, показывают, что при индукции 2 Тл ток насыщения коллектора уменьшается на 13 %, а при 4 Тл – на 38%. Обсуждены пределы применимости модели и намечены перспективы распространения подхода на гетеропереходные полевые транзисторы с двумерным электронным газом.

Ключевые слова: *биполярный транзистор, вольт-амперная характеристика, поперечное магнитное поле, неосновные носители заряда, диффузионная длина, подвижность, угол Холла, коэффициент переноса базы, магнитотранзистор, магниточувствительность.*

ANALYTICAL MODEL OF THE TRANSVERSE MAGNETIC FIELD EFFECT ON THE CURRENT–VOLTAGE CHARACTERISTIC OF A BIPOLAR TRANSISTOR

Annotation. *The effect of a transverse magnetic field on the current-voltage (I-V) characteristic of a bipolar transistor is studied theoretically. The I-V characteristic of a p-n-p structure is first derived consistently within the classical diffusion theory: the continuity equation for minority carriers in the base is solved with the boundary conditions of the p-n junction theory, and closed analytical expressions are obtained for the distribution of injected holes, the collector current density and the base transport factor. The influence of the magnetic field is then introduced on the basis of the Drude model and the Einstein relation: it is shown that the effective mobility, the diffusion coefficient and the diffusion length of minority carriers decrease with increasing magnetic field induction, which is equivalent to an effective thickening of the base. Generalized analytical expressions are obtained for the collector current and the base transport factor in a magnetic field. In the weak-field region the effect is quadratic in the magnetic field induction and proportional to the square of the carrier mobility, so the sensitivity grows sharply in high-mobility materials. Numerical calculations performed for germanium show that at an induction of 2 T the collector saturation current decreases by 13%, and at 4 T by 38%. The applicability limits of the model are discussed, and the prospects of extending the approach to heterojunction field-effect transistors with a two-dimensional electron gas are outlined.*

Keywords: *bipolar transistor, current–voltage characteristic, transverse magnetic field, minority charge carriers, diffusion length, carrier mobility, Hall angle, base transport factor, magnetotransistor, magnetosensitivity.*

Kirish. Yarimo‘tkazgichli asboblarga tashqi magnit maydon ta’sirini o‘rganish ham fundamental, ham amaliy jihatdan muhim ahamiyatga ega. Magnit maydonga sezgir strukturalar – Hall datchiklari, magnitodiodlar va magnitotranzistorlar – zamonaviy sensorika va o‘lchov texnikasining ajralmas elementiga aylangan [1], [2]. Bunday asboblarni maqsadli loyihalash uchun magnit maydonning asbob xarakteristikalariga ta’sirini oddiy va shaffof analitik model doirasida ifodalash talab etiladi.

Bipolyar tranzistor nazariyasining asoslari Shockley [3] hamda Ebers va Moll [4] ishlarida yaratilgan bo‘lib, uning batafsil bayoni klassik darsliklarda [5], [6] keltirilgan. Ushbu nazariyaga ko‘ra tranzistorning ishlashi bazaga inyeksiyalangan asosiy bo‘lmagan zaryad tashuvchilarning diffuzion tashilishiga asoslanadi. Magnit maydonda esa Lorents kuchi tashuvchilar trayektoriyasini egib, tashilish yo‘nalishidagi effektiv harakatchanlik va diffuziya koeffitsiyentini kamaytiradi. Bu hodisa galvanomagnit effektlar nazariyasida yaxshi ma’lum bo‘lsa-da [1], [2], uning bipolyar tranzistorning to‘liq VAX ifodasiga yakuniy analitik formulalar darajasigacha yetkazilgan holda kiritilishi adabiyotda yetarlicha yoritilmagan. Mazkur ishning maqsadi – bipolyar tranzistor VAXni diffuzion nazariya asosida keltirib chiqarish va uni ko‘ndalang magnit maydon uchun umumlashtirib, kollektor toki hamda bazada tashish koeffitsiyentining magnit maydon induksiyasiga bog‘liqligini oshkor analitik ko‘rinishda olish, natijalarning fizik talqini va miqdoriy baholarini berishdir.

Tadqiqot obyekti va qo‘llanilgan metodlar. Tadqiqot obyekti – aktiv rejimda ishlayotgan p-n-p strukturali bipolyar tranzistor. Qo‘llanilgan metodlar – yarimo‘tkazgichlarning diffuzion transport nazariyasi, Drude modeli va Eynshteyn munosabati asosidagi analitik tahlil hamda sonli hisoblash.

Koordinata boshi sifatida emitter o‘tishning baza tomonidagi chetini olamiz, baza $0 \le x \le d$ oraliqni egallaydi; bu yerda: d – bazaning kengligi, x – emitterdan kollektorga yo‘nalgan koordinata. O‘tishlarning qarshiligi kvazineytral sohalar qarshiligidan ancha katta bo‘lgani uchun tashqi kuchlanish amalda faqat o‘tishlarga tushadi va baza ichida elektr maydonni nolga teng deb olish mumkin. Bu holda bazadagi kovaklar faqat diffuziya yo‘li bilan tashiladi va kovaklarning tok zichligi:

$$j_p = -eD_p \frac{dp}{dx} \qquad (1)$$

ko‘rinishda yoziladi, bu yerda: j_p – kovaklar tok zichligi, e – elementar zaryad, D_p – kovaklarning diffuziya koeffitsiyenti, $p=p(x)$ – bazadagi kovaklar konsentratsiyasi.

Statsionar holatda diffuziya hisobiga keltirilayotgan kovaklar oqimi rekombinatsiyada yo‘qolayotgan kovaklar bilan muvozanatlashadi va uzluksizlik tenglamasi hosil bo‘ladi:

$$\frac{d^2p}{dx^2} = \frac{p-p_n}{L_p^2}, \qquad L_p = \sqrt{D_p \tau_p}, \qquad (2)$$

bu yerda: p_n – bazadagi kovaklarning muvozanat konsentratsiyasi, τ_p – kovaklarning yashash (rekombinatsiya) vaqti, L_p – diffuziya uzunligi, ya’ni, kovak rekombinatsiyalangunga qadar o‘tadigan o‘rtacha masofa.

Tenglama (2) uchun chegaraviy shartlar p-n o‘tish nazariyasidagi Boltzmann munosabatidan olinadi: to‘g‘ri ulangan emitter o‘tish chegarasida konsentratsiya eksponensial ortadi, teskari ulangan kollektor chegarasida esa bosiladi:

$$p(0) = p_n e^{\frac{eV_э}{kT}}, \qquad p(d) = p_n e^{-\frac{eV_к}{kT}} \qquad (3)$$

bu yerda: $V_э$ – emitter o‘tishga to‘g‘ri yo‘nalishda qo‘yilgan kuchlanish, $V_к$ – kollektor o‘tishdagi teskari kuchlanishning absolut qiymati, k – Boltzmann doimiysi, T – mutlaq harorat.

Tenglama (2) ning umumiy yechimi ikki eksponentaning chiziqli kombinatsiyasidan iborat bo‘lib, doimiylar (3) shartlardan aniqlanadi. Natija giperbolik funksiyalar orqali ixcham yoziladi:

$$p(x) - p_n = p_n \left(e^{\frac{eV_э}{kT}} - 1\right) \frac{\mathrm{sh}\frac{d-x}{L_p}}{\mathrm{sh}\frac{d}{L_p}} - p_n \left(1 - e^{-\frac{eV_к}{kT}}\right) \frac{\mathrm{sh}\frac{x}{L_p}}{\mathrm{sh}\frac{d}{L_p}} \qquad (4)$$

bu yerda sh – giperbolik sinus. Birinchi had emitter inyeksiya qilgan kovaklar hissasini, ikkinchisi kollektor so‘rib olayotgan kovaklar hissasini ifodalaydi; ifoda chegaraviy shartlarni avtomatik qanoatlantiradi.

Kollektor orqali oqadigan kovak toki (1)da (4)dan $x=d$ nuqtada hosila olish orqali topiladi. Teskari ulangan kollektor o‘tish orqali kollektor sohasidagi ozchilik elektronlarning teskari to‘yinish toki ham oqadi. Ikkala hissani qo‘shib, kollektorning to‘liq tok zichligini olamiz [5], [6]:

$$j_к = \frac{eD_p p_n}{L_p} \left[\left(e^{\frac{eV_э}{kT}} - 1\right) \mathrm{csch}\frac{d}{L_p} + \left(1 - e^{-\frac{eV_к}{kT}}\right) \mathrm{cth}\frac{d}{L_p}\right] + \frac{eD_n n_{кр}}{L_{кn}} \qquad (5)$$

bu yerda: $j_к$ – kollektor tok zichligi, csch va cth –giperbolik kosekans va kotangens, D_n –elektronlarning diffuziya koeffitsiyenti, $n_{кр}$–kollektor sohasidagi ozchilik elektronlarning muvozanat konsentratsiyasi, $L_{кn}$ – elektronlarning kollektor sohasidagi diffuziya uzunligi. Ifoda (5) tranzistorning VAX bo‘lib, kollektor tokini ikkala boshqaruvchi kuchlanish orqali to‘liq ifodalaydi: csch oldidagi had emitterdan kollektorgacha yetib kelgan inyeksion hissani, cth oldidagi had kollektor o‘tishning o‘z hissasini beradi.

Tranzistor sifatining muhim o‘lchovi – bazada tashish koeffitsiyenti. Ifoda (5) hosilasidagi oraliq natijalardan aktiv rejim uchun

$$\beta = \frac{j_{кр}}{j_{эр}} = \mathrm{sch}\frac{d}{L_p} \approx 1 - \frac{d^2}{2L_p^2} \qquad (6)$$

kelib chiqadi, bu yerda: $j_{кр}$ va $j_{эр}$, mos ravishda, kollektor va emitterdagi kovak tok zichliklari, sch – giperbolik sekans; yaqinlashuv yupqa baza ($d \ll L_p$) holiga tegishli. Baza qancha yupqa bo‘lsa, kovaklarning shuncha katta qismi rekombinatsiyaga ulgurmasdan kollektorga yetib boradi.

Endi strukturaga kovaklar oqimiga ko‘ndalang bo‘lgan $\vec{B}=(0,0,B)$ magnit maydon qo‘yilgan bo‘lsin, bu yerda B – magnit maydon induksiyasi. Zaryad tashuvchining o‘rtacha dreyf harakati uchun Drude modelidagi kuchlar balansi

$$e\vec{E} + e\left[\vec{v} \times \vec{B}\right] - \frac{m^* \vec{v}}{\tau} = 0 \qquad (7)$$

ko‘rinishga ega, bu yerda: $\vec{E}$–elektr maydon kuchlanganligi, $\vec{v}$ – o‘rtacha dreyf tezligi, m^* – effektiv massa, τ –impuls relaksatsiya vaqti. Tenglamani komponentlarga ajratib, harakatchanlik $\mu_p = e\tau/m^*$ belgisini kiritamiz; magnit maydon tezlikning ikki komponentini o‘zaro bog‘laydi va ko‘ndalang maydon to‘planmaydigan ($E_y=0$) geometriyada tizim bevosita yechilib, tashilish yo‘nalishidagi effektiv harakatchanlik uchun

$$\mu_p^{eff}(B) = \frac{\mu_p}{1 + \mu_p^2 B^2} \qquad (8)$$

kelib chiqadi. O‘lchamsiz $\mu_p B$ kombinatsiya Hall burchagi tangensiga teng, $\mu_p B=\mathrm{tg}\theta_H$, bu yerda θ_H – Hall burchagi, ya’ni, tashuvchi trayektoriyasining maydon yo‘nalishidan og‘ish burchagi: burilish qancha katta bo‘lsa, oldinga siljish shuncha samarasiz bo‘ladi.

Diffuziya va dreyf bitta sochilish jarayonining ikki ko‘rinishi bo‘lgani uchun Eynshteyn munosabati $D_p=(kT/e)\,\mu_p$ magnit maydonda ham o‘rinli va diffuziya koeffitsiyenti harakatchanlik bilan bir xil qonuniyatda kamayadi:

$$D_p(B)=\frac{D_p}{1+\mu_p^2B^2} \tag{9}$$

Rekombinatsiya vaqti birinchi yaqinlashuvda magnit maydonga bog‘liq emas, chunki magnit maydon tashuvchi energiyasini o‘zgartirmaydi. Shu sababli diffuziya uzunligi

$$L_p(B)=\sqrt{D_p(B)\,\tau_p}=\frac{L_p}{\sqrt{1+\mu_p^2B^2}} \tag{10}$$

qonuniyat bo‘yicha kamayadi: egilgan trayektoriyali tashuvchi o‘z umri davomida asosiy yo‘nalishda qisqaroq masofani bosib o‘tadi.

Klassik hosila magnit maydon haqida faqat D_p va L_p parametrlari orqali “biladi”, shuning uchun (2)–(5) bosqichlari $D_p\to D_p(B)$, $L_p\to L_p(B)$ almashtirishlar bilan aynan takrorlanadi va ko‘ndalang magnit maydondagi umumlashgan VAX hosil bo‘ladi:

$$j_{\text{к}}(V_{\text{э}},V_{\text{к}},B)=\frac{eD_p(B)\,p_n}{L_p(B)}\left[\left(e^{\frac{eV_{\text{э}}}{kT}}-1\right)\operatorname{csch}\frac{d}{L_p(B)}+\left(1-e^{-\frac{eV_{\text{к}}}{kT}}\right)\operatorname{cth}\frac{d}{L_p(B)}\right]+\frac{eD_n n_{\text{кр}}}{L_{\text{кп}}} \tag{11}$$

Bazada tashish koeffitsiyenti uchun (6) va (10) dan

$$\beta(B)=\operatorname{sch}\left(\frac{d}{L_p}\sqrt{1+\mu_p^2B^2}\right) \tag{12}$$

kelib chiqadi. B=0da (11), (12) klassik (5), (6)ga aynan qaytadi. Ifoda (12) ni “bazaning effektiv qalinlashuvi” tilida o‘qish qulay: magnit maydonda tranzistor xuddi bazasi $\sqrt{1+\mu_p^2B^2}$ marta qalinlashgandek ishlaydi.

Kuchsiz maydonlar ($\mu_p B\ll 1$) sohasida (12)ni qatorga yoyish tashish koeffitsiyentining nisbiy o‘zgarishi uchun

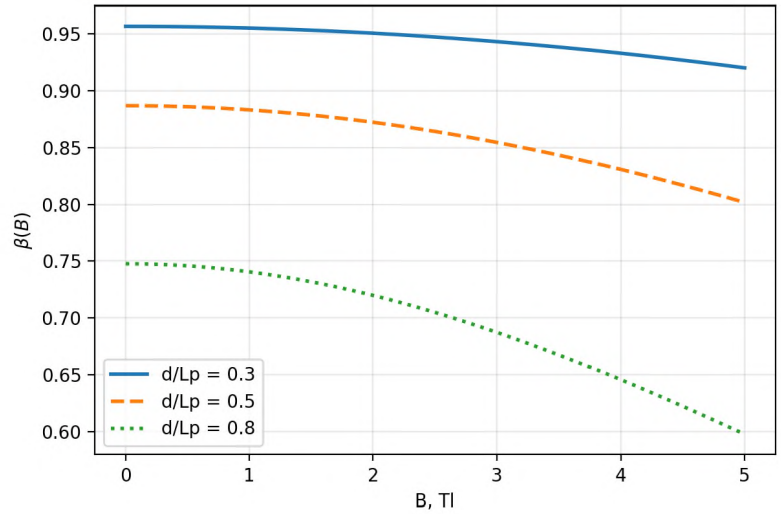
$$\frac{\beta(0)-\beta(B)}{\beta(0)}\approx\frac{d}{2L_p}\operatorname{th}\left(\frac{d}{L_p}\right)\mu_p^2B^2 \tag{13}$$

ifodani beradi, bu yerda th – giperbolik tangens. Bundan ikkita xulosa kelib chiqadi: effekt magnit maydon induksiyasiga kvadratik bog‘liq (maydon yo‘nalishi teskarisiga o‘zgartirilganda o‘zgarmaydi) va harakatchanlik kvadratiga proporsional, ya’ni, yuqori harakatchanlikka ega materiallar keskin sezgirroq bo‘ladi.

Modelning qo‘llanish chegaralari quyidagicha. Impuls relaksatsiya vaqti energiyaga bog‘liq bo‘lmagan doimiy deb olindi; aniqroq kinetik tahlilda (8), (9)dagi sonli koeffitsiyentlar sochilish mexanizmiga bog‘liq birlik tartibidagi tuzatishlar oladi, biroq bog‘liqlik ko‘rinishi saqlanadi. E_y=0 sharti Hall maydoni to‘planmaydigan geometriyaga mos keladi; Hall maydoni to‘liq shakllansa, u Lorents kuchini qisman kompensatsiyalaydi va effekt kuchsizlanadi, ya’ni (11), (12) effektning yuqori bahosini beradi. Sirt rekombinatsiyasi, bazadagi ichki maydon va kuchli inyeksiya effektlari hisobga olinmadi; model kvantlanish muhim bo‘ladigan o‘ta kuchli maydonlarga qo‘llanilmaydi.

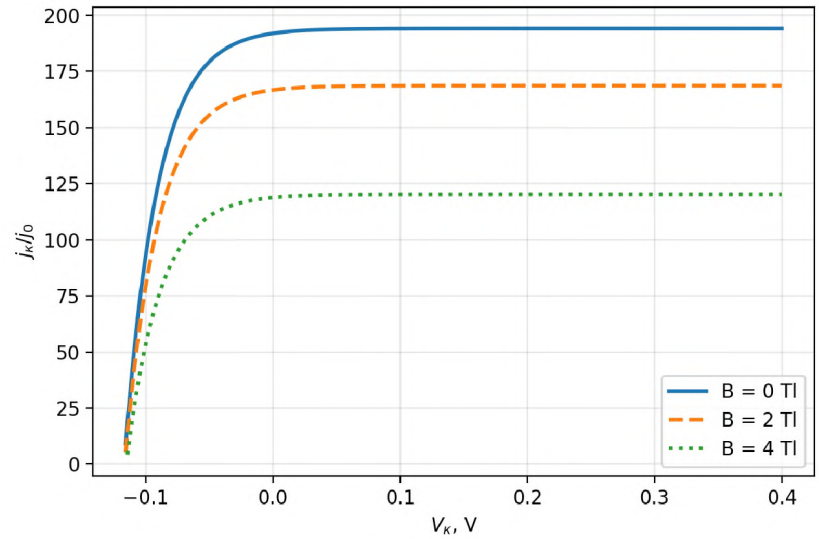
Olingan natijalar va ularning tahlili. Sonli hisoblashlar (11), (12) asosida germaniydagi kovaklarga xos μ_p=0.19 m²/(V·s) harakatchanlik uchun xona haroratida bajarildi: germaniyda harakatchanlik kremniyga nisbatan yuqori bo‘lgani uchun effekt yaqqolroq namoyon bo‘ladi va uni tajribada kuzatish osonroq.

Tashish koeffitsiyentining magnit maydonga bog‘liqligi bazaning uch xil nisbiy qalinligi uchun keltirilgan (1-rasm). Barcha egri chiziqlar nol maydon atrofida gorizontal tekis boshlanadi – bu (13) dagi kvadratik xarakterning bevosita ko‘rinishi – so‘ngra maydon ortishi bilan monoton pasayadi. Sonli baholar effekt miqyosini ko‘rsatadi: d/L_p=0.5 da B=1 Tl maydonda tashish koeffitsiyentining nisbiy kamayishi atigi 0.4% bo‘lsa, B=4 Tlda 6.3%ga, B=5 Tlda 9.6%ga yetadi. Effekt qalin bazali strukturalarda kuchliroq: yupqa bazada tashuvchilar rekombinatsiyaga ulgurmaydi va trayektoriyaning biroz uzayishi deyarli sezilmaydi, qalin bazada esa har qanday qo‘shimcha kechikish rekombinatsion yo‘qotishlarni sezilarli oshiradi.



1-rasm. Bazada tashish koeffitsiyentining magnit maydon induksiyasiga bog‘liqligi (12):d/Lp = 0.3;0.5; 0.8.

Tranzistorning chiqish VAX oilasi ($V_э$=0.12 V, d/L_p=0.5) magnit maydonning uch qiymati uchun keltirilgan (2-rasm). Xarakteristikalarning umumiy ko‘rinishi klassik holatdagidek saqlanadi: kollektor kuchlanishining musbat qiymatlarida tok to‘yinadi, manfiy qiymatlarida kollektor o‘tish to‘g‘ri yo‘nalishga o‘tib, tok keskin pasayadi. Magnit maydon ta’siri to‘yinish tokining sistematik kamayishida namoyon bo‘ladi: B=2 Tlda to‘yinish toki 13%ga, B=4 Tlda 38%ga kamayadi. Bu ikki omilning natijasi: (11)dagi $D_p(B)/L_p(B)$ prefaktorning kamayishi va csch argumentining ortishi; ikkinchi omil ustuvor, chunki csch katta argumentlarda eksponensial pasayadi.

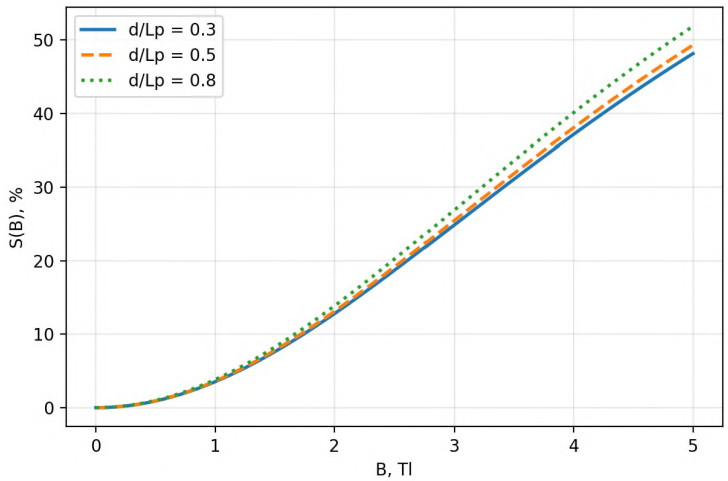


2-rasm. Chiqish volt-amper xarakteristikalari (11) magnit maydonning turli qiymatlarida: B = 0; 2; 4 Tl (Vэ = 0.12 V, d/Lp = 0.5).

Asbobning magnitosezgirligini miqdoriy tavsiflash uchun to‘yinish rejimidagi kollektor tokining nisbiy o‘zgarishini kiritamiz:

$$S(B)=\frac{j_к(0)-j_к(B)}{j_к(0)}\cdot 100\ \% \qquad (14)$$

Ushbu kattalikning maydonga bog‘liqligi (3-rasm) shuni ko‘rsatadiki, tokning nisbiy o‘zgarishi tashish koeffitsiyentining o‘zgarishidan bir necha barobar katta: d/L_p=0.5 uchun B=2 Tl da S=13.1 %, B=5 Tl da esa qariyb 50%. Sababi, to‘yinish toki sch dan tashqari prefaktor va csch hadi orqali ham maydonga bog‘liq bo‘lib, barcha omillar bir yo‘nalishda ishlaydi. Demak, magnitosezgir asbob sifatida kollektor tokini o‘lchash tashish koeffitsiyentini o‘lchashdan samaraliroq usuldir.



3-rasm. To‘yinish rejimidagi kollektor tokining nisbiy o‘zgarishi (14): d/Lp = 0.3; 0.5; 0.8 (Vэ = 0.12 V).

Effekt harakatchanlik kvadratiga proporsional bo‘lgani uchun harakatchanligi germaniynikidan tartib jihatidan yuqori materiallarda (InSb, InAs) xuddi shu nisbiy o‘zgarishlarga o‘n barobar kichik maydonlarda erishiladi. Xuddi shu mulohaza ikki o‘lchamli elektron gazli geteroo‘tishli strukturalarga ham taalluqli: HFET/HEMT strukturalarida kanal elektronlarining harakatchanligi hajmiy materiallardagidan sezilarli yuqori bo‘lgani sababli magnit maydon effektlari past maydonlarda ham kuchli namoyon bo‘lishi kutiladi. Bundan tashqari, olingan (11) – (13) ifodalar tajriba ma’lumotlarini qayta ishlashga qulay: kuchsiz maydonlarda kollektor toki logarifmining induksiya kvadratiga chiziqli bog‘liqligi kutiladi va uning qiyaligi orqali bazadagi ozchilik tashuvchilar harakatchanligini mustaqil aniqlash mumkin.

Xulosa. Ishda quyidagi asosiy natijalar olindi. Bipolyar p-n-p tranzistorning VAX diffuzion nazariya doirasida izchil keltirib chiqarildi va ko‘ndalang magnit maydon ta’siri Drude modeli hamda Eynshteyn munosabati asosida umumlashtirilib, kollektor toki (11) va bazada tashish koeffitsiyenti (12) uchun yopiq analitik ifodalar olindi. Magnit maydon ozchilik tashuvchilarning diffuziya uzunligini $\sqrt{1+\mu_p^2 B^2}$ marta kamaytirib, bazaning effektiv qalinlashuviga olib kelishi ko‘rsatildi; kuchsiz maydonlarda effekt induksiyaga kvadratik va harakatchanlik kvadratiga proporsional (13). Germaniy uchun sonli hisoblashlar d/L_p=0.5da B=2 Tl maydonda to‘yinish tokining 13%ga, B=4 Tlda 38%ga kamayishini ko‘rsatdi; kollektor toki o‘zgarishi tashish koeffitsiyenti o‘zgarishidan bir necha barobar katta bo‘lib, magnitosezgirlikning samaraliroq indikatoridir. Olingan ifodalar magnit maydondagi VAX o‘lchovlari orqali baza transport parametrlarini aniqlash imkonini beradi; yondashuvni yuqori harakatchanlikli geteroo‘tishli strukturalarga (HFET) umumlashtirish keyingi tadqiqot bosqichi sifatida belgilandi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati:

(1). Baltes H.P., Popović R.S. Integrated semiconductor magnetic field sensors // Proceedings of the IEEE, 1986, vol. 74, № 8, p. 1107–1132.

(2). Popović R.S. Hall Effect Devices. Bristolб IOP Publishing, 2004, 420 p.

(3). Shockley W. The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors. Bell System Technical Journal, 1949, vol. 28, № 3, p. 435–489.

(4). Ebers J.J., Moll J.L. Large-signal behavior of junction transistors. Proceedings of the IRE, 1954, vol. 42, № 12, p. 1761–1772.

(5). Sze S.M., Ng K.K. Physics of Semiconductor Devices. Hoboken, Wiley, 2007, 815 p.

(6). Azizov M.A. Yarimo‘tkazgichlar fizikasi. Toshkent, “O‘zbekiston”, 1994, 184–190-betlar.

(7). Zieren V., Duyndam B.P.M. (1982). Magnetic-field-sensitive multicollector n-p-n transistors. IEEE Transactions on Electron Devices, 29(1), p. 83–90.

(8). Vinal A.W., Masnari N.A. (1982). “Magnetic transistor behavior explained by modulation of emitter injection, not carrier deflection.” IEEE Electron Device Letters.

(9). Popovic R.S., Widmer R. (1986). “Magnetotransistor in CMOS technology.” IEEE Transactions on Electron Devices, 33(9), p. 1334–1340.

(10). Burghartz J.N. va boshqalar (1987). “Optimization of lateral magnetotransistors with integrated signal amplification.” Sensors and Actuators, 11(1), p. 91–98.

(11). Popovic R.S. va boshqalar (1983). “Dual-collector magnetotransistor optimized with respect to injection modulation.” Sensors and Actuators, 4, p. 155–163.

(12). Roumenin Ch.S. (1990). “Bipolar magnetotransistor sensors. An invited review.” Sensors and Actuators A: Physical, 24(2), p. 83–105.

(13). Castagnetti R., Wachutka G., Riccobene C., Baltes H. (1994). “Bipolar magnetotransistor: Relative sensitivity revisited.” ESSDERC 1994, p. 71–74.

(14). Trujillo H., Rodriguez F., Cruz J.C. (1996). “An approach to the electrical modelling of bipolar magnetotransistors.” Sensors and Actuators A: Physical, 56(3), p. 221–225.

(15). Trujillo H. va boshqalar (1995). “Merged lateral bipolar magnetotransistors.” Sensors and Actuators A: Physical, 50(3), p. 177–181.

(16). Nagy A., Trujillo H. (1998). “Highly sensitive magnetotransistor with new topology.” Sensors and Actuators A: Physical, 65(2–3), p. 97–100.

Ismailov Islombek Ilxombek o‘g‘li (Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti “Matematik tahlil” kafedrasi o‘qituvchisi; islombekursu@gmail.com),
Qurbanov Kamron Sanjar o‘g‘li (Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti “Matematik tahlil” kafedrasi o‘qituvchisi; kamron_kurbanov@mail.ru),
Sotimboyeva Zarina Ollabergan qizi (Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti Fizika-matematika fakulteti talabasi; zarinaursu@gmail.com)

EYLER FUNKSIYASI YORDAMIDA YECHILADIGAN NOSTANDART MASALALAR HAQIDA

Annotatsiya. *Ushbu maqolada sonlar nazariyasining fundamental va amaliy tushunchalaridan biri bo‘lgan Eyler funksiyasi, uning asosiy xossalari hamda algebraik, kombinatorik va olimpiada xarakteridagi nostandart masalalarni yechishdagi o‘rni va tatbiqlari keng atrofda tadqiq qilingan. Maqolada Eyler funksiyasining multiplikativlik xossasi, u bilan bog‘liq teoremalar (Eyler va Fermaning kichik teoremalari) va lemmalarning nazariy isbotlari keltirilgan. Shuningdek, yuqori darajali ko‘rsatkichli taqqoslamalarni yechish, sonlarning oxirgi raqamlarini hamda qoldiqlarni aniqlash, egizak tub sonlar va murakkab sonlar uchun tengsizliklarni isbotlashga doir murakkab va nostandart masalalarni sodda hamda samarali usullar yordamida yechish modellari ishlab chiqilgan. Maqola yakunida amaliy va mantiqiy tafakkurni rivojlantirishga qaratilgan mustaqil yechish uchun oliy darajali masalalar to‘plami taklif etilgan.*

Kalit so‘zlar: *tub sonlar, murakkab son, Eyler funksiyasi, Fermaning kichik teoremasi.*

О НЕСТАНДАРТНЫХ ЗАДАЧАХ, РЕШАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИИ ЭЙЛЕРА

Аннотация. *В данной статье подробно исследована функция Эйлера, являющаяся одним из фундаментальных и прикладных понятий теории чисел, а также ее свойства и применение при решении нестандартных, алгебраических и олимпиадных задач. В работе приведены теоретические доказательства свойства мультипликативности функции Эйлера, ключевых лемм и теорем (теоремы Эйлера и малой теоремы Ферма). Разработаны эффективные и упрощенные модели решения сложных задач, связанных с нахождением остатков от деления, определением последних цифр высоких степеней чисел, а также доказательством неравенств для составных и парных простых чисел. В заключительной части статьи представлен комплекс задач для самостоятельного решения, направленный на развитие логического мышления и исследовательских навыков учащихся.*

Ключевые слова: *простые числа, составные числа, функция Эйлера, малая теорема Ферма.*

ON NON-STANDARD PROBLEMS SOLVED USING EULER’S TOTIENT FUNCTION

Annotation. *This paper presents a comprehensive study of Euler's totient function, one of the fundamental concepts in number theory with significant theoretical and practical applications. The work explores the key mathematical properties of Euler's function, including its multiplicativity, alongside rigorous theoretical proofs of related lemmas and core theorems, such as Euler's theorem and Fermat's Little Theorem. Efficient methodologies and algorithmic models are proposed to solve non-standard, high-level contest problems involving modular exponentiation, remainder evaluation, determination of trailing digits, and inequality proofs for prime and composite numbers. Furthermore, a curated set of advanced problems is provided for independent study to enhance analytical problem-solving and algorithmic thinking.*

Key words. *Prime numbers, composite numbers, Euler's totient function, Fermat's little theorem.*

Kirish. Zamonaviy matematika, axborot xavfsizligi va kriptografiya sohalarining jadal rivojlanishi sonlar nazariyasining fundamental tushunchalariga bo‘lgan talabni yanada oshirmoqda. Ana shunday mu-